

УДК: 622.723

А.В.КОНЕВ, канд. физ.-мат. наук, заместитель генерального директора, 190712@land.ru

С.П.КИСЕЛЕВА, канд. техн. наук, главный специалист, ksp@sibmetproekt.ru

ОАО «СибцветметНИИпроект», Красноярск

К.А.ШТРЕСЛЕР, доцент, sibirak@land.ru

Ж.В.МИРОНОВА, канд. техн. наук, доцент, mirgenni@yandex.ru

Сибирский федеральный университет, Красноярск

A.V.KONEV, PhD in phys. & math. sc., the deputy director general, 190712@land.ru

S.P.KISELYOVA, PhD in eng. sc., chief specialist, ksp@sibmetproekt.ru

Sibtsvetmetniiprojekt, Krasnoyarsk

K.A.SHTRESLER, associate professor, sibirak@land.ru

Zh.V.MIRONOVA, PhD in eng. sc., associate professor, mirgenni@yandex.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ЗОЛОТА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ОБОГАЩЕНИЕМ

В современных условиях ввиду технологических особенностей производства горно-металлургический комплекс испытывает дефицит минерального сырья надлежащего качества. Особого внимания заслуживает вопрос воздействия горных предприятий на окружающую среду. Внедрение предварительного обогащения в промышленных масштабах позволит решить проблему вовлечения в разработку бедных и забалансовых руд и значительно снизит негативное воздействие производств на экологию путем снижения объемов глубокого обогащения горной массы до 70 %.

Ключевые слова: предварительное обогащение руд, бедные руды, забалансовые руды, горно-металлургический комплекс, добыча рудных полезных ископаемых, минерально-сырьевая база, обогащение.

PROBLEMS OF MINING OF NON-FERROUS METALS AND GOLD DEPOSITS WITH PRE-ENRICHMENT

In modern conditions of production due to the technological features of mining-metallurgical complex is deficient mineral adequate quality. Special attention must be given to the impact of mines on the environment. The introduction of pre-enrichment on an industrial scale will solve the problem involved in the development of the poor and discarded ore and significantly reduce the negative impact on the environment by reducing the amount of deep concentration of rock up to 70 %.

Key words: pre-enrichment ore, poor ore, discarded ore, the mining-metallurgical complex, mining operations, the mineral-raw-material base.

Потребление полезных ископаемых удваивается по экспоненте каждые 8-10 лет, что приводит к истощению минерально-сырьевых ресурсов России, основу которых составляют разведанные и учтенные государственным балансом еще в период СССР месторождения со значительными запасами

преимущественно рядовых и бедных руд, труднообогатимых, залегающих на значительных глубинах со сложными горно-геологическими и горно-техническими условиями добычи. Кондиционные части месторождений, окруженные на 50-80 % породой и забалансовой рудой, стали пассивными на

20-80 % вследствие изменения в 90-х гг. прошлого столетия экономических, правовых и экологических условий освоения. Переоценка запасов с учетом мировых цен на металлы показывает, что в категорию забалансовых руд в ближайшей перспективе перейдет 34 % свинцовых, 49 % оловянных, от 15 до 30 % титановых, медных и вольфрамовых руд. Доля таковых в обогащаемом сырье возросла за последние 20 лет с 15 до 40 %, содержание цветных металлов и золота в них снизилось в 1,2-1,5 раза [13]. Перерабатываемые руды обедняются также из-за применения дешевых массовых способов отработки месторождений, высокопроизводительной горной техники, затрудняющих селективную выемку.

В то же время переработка ископаемых с применением традиционных технологий глубокого обогащения становится нерентабельной, поскольку их возможности исчерпаны и неэффективны для руд с субмикрoзернистой структурой, минеральные агрегаты которых сложно раскрыть селективно на отдельные фазы с полезным компонентом. Для этого их необходимо измельчать до крупности $50 + 5$ мкм, при этом значительная часть энергии процесса расходуется не на раскалывание, а на пластическую деформацию минеральных частиц [12], что снижает эффективность работы мельниц, ухудшает физико-химические свойства поверхности частиц, на использовании которых основано обогащение флотацией. Недоизмельчение руд приводит к потерям полезного компонента в смесях с минералами пород в хвостах, переизмельчение – к потерям со шламами.

Обеднение и снижение качества руд стимулирует применение все более сложных схем измельчения и обогащения, видов обогащения, реагентов, вследствие чего растет себестоимость переработки, опережая рыночные цены на конечную продукцию, снижается конкурентоспособность, а следовательно, инвестиционная привлекательность минерально-сырьевого комплекса России.

Радикальным решением проблемы является изменение схемы переработки руд, когда в концентрат извлекается легкообогат-

щаемая часть полезных минералов, а нераскрытые агрегаты в виде бедного концентрата либо промпродукта направляются в химико-металлургический передел. Это позволяет получать металлы или химические соединения с высоким сквозным извлечением и максимальной комплексностью использования сырья, но приводит к удорожанию товарной продукции. Качество концентрата, при котором дальнейшее обогащение нецелесообразно, устанавливается путем исследования минералогического состава, обогатимости руд, экономическими расчетами по всему циклу от разведки до получения конечной продукции из руд данного месторождения [2, 13].

Для устранения экономического барьера применения химико-металлургических технологий необходимо снижать затраты, связанные с разведкой, добычей, транспортировкой и глубоким обогащением, в том числе за счет выделения породы и забалансовой руды из отбитой горной массы с использованием предварительного обогащения (ПО) – комплекса методов и средств преимущественно сухого механического разделения на продукты с повышенным содержанием полезных компонентов и породу с использованием зависимости между содержанием компонентов и физическими свойствами частиц (кусков или порций): размером, плотностью, анизотропией, интенсивностью (плотностью потока) естественного (природного), отраженного (рассеянного) либо наведенного излучений (люминесценции, флуоресценции, активированного), оптического, рентгеновского, гамма- и нейтронного, изменений магнитных, электростатических и электромагнитных свойств [11].

Таким образом, если задачей глубокого обогащения является селективное раскрытие измельчением и мокрое выделение в концентрат минералов (агрегатов) полезных компонентов крупностью $1 \text{ мм} + 5 \text{ мкм}$, с использованием преимущественно физико-химических свойств поверхности их частиц, то ПО – массовое (валовое) раскрытие и сухое выделение в хвосты полиминеральных кусков (частиц) породы крупностью $350 + 1 \text{ мм}$ с использованием их физических свойств.

Доля кондиционной руды в различных месторождениях

Руды	Доля кондиционной руды, %	Содержание полезного компонента в рудах, % по массе	Кларковское содержание полезного компонента, % по массе
Алмазосодержащие	1-2	10^{-7} - 10^{-6}	—
Золотосодержащие	10-25	10^{-5} - 10^{-4}	$5 \cdot 10^{-7}$
Редкоземельные	20-30	10^{-4} - 10^{-2}	$1 \cdot 10^{-3}$ - $8 \cdot 10^{-4}$
Редкометалльные	30-35	10^{-3} - 10^{-1}	$1 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^{-7}$
Урансодержащие	35-50	10^{-2} - 10^{-1}	$3 \cdot 10^{-4}$ - $8 \cdot 10^{-4}$
Полиметаллические	30-50	10^{-1} -10	$1 \cdot 10^{-2}$ - $1 \cdot 10^{-3}$
Флюоритовые, нефелиновые и др.	50-80	10-50	—

В пограничной области (10 + 1 мм) используют и мокрые, и сухие методы ПО: отсадку, тяжелые суспензии, магнитную сепарацию. Использование водных и специальных сред принуждает размещать комплексы на их основе рядом с обогатительной фабрикой (ОФ), тогда как для снижения транспортных издержек целесообразнее приближать их к рудникам.

Разнообразные средства ПО производят более полувека, но заметного прогресса их применения в промышленных масштабах нет в том числе из-за отсутствия методик исследования в части рудоподготовки, оценки показателей и расчета технологических схем, разработки ТЭО кондиций и инвестиций, что препятствует проектированию фабрик предварительного обогащения (ФПО). Изданы монографии, сотни статей с описанием результатов исследований, испытаний средств обогащения на различных типах руд, обобщенных в виде требований Государственного комитета по запасам (ГКЗ) к стадии разведки месторождений [11], основанных на представлениях разработанной в середине прошлого столетия В.А.Мокроусовым [4] и Л.Ч.Пухальским [9] теории контрастности.

Степень разубоживания

$$R = R_{г.э} + R_{г.т},$$

где $R_{г.э}$ – геолого-экономическое разубоживание, обусловленное наличием в рудном теле участков породы и некондиционных порций, условиями разведки, оконтуривания и подсчета экономически активных запасов месторождения, $R_{г.т}$ – горно-технологическое разубоживание, определяемое способом, технологией и планами предприятия по добыче руд.

Величина R практически постоянна для данного месторождения, тогда как $R(T) \geq 0$ может варьироваться в достаточно широких пределах в зависимости от того, каких кондиций руды требует ОФ. Очевидно, что на горно-технологической стадии производства минимальное значение $M \rightarrow R_{г.э}$ составляет для месторождений полиметаллических руд 0,30-0,50, для редкометалльных и золотосодержащих руд 0,50-0,90, для алмазосодержащих 0,90-0,98 (см. таблицу).

Значение R определяет, в свою очередь, теоретический предел кратности предварительного обогащения

$$K_{ПО} = \frac{Q}{Q_k} = \frac{C_k}{C_p} = \frac{1}{1-R},$$

где C_p и C_k – содержание полезного компонента в отбитой руде и в концентрате ПО соответственно, достигающего для алмазосодержащих руд 30-50 %, для золотосодержащих 5-10 %, понижаясь до 2-3 % для полиметаллических руд.

Закономерности изменения показателя обогатимости (M) в процессах отбойки, дробления и грохочения руд до настоящего времени, однако, не изучены, что делает принятый в работе [11] критерий оценки обогатимости руд формальным, не связанным функционально с их природными свойствами, не учитывающим влияние технологических и экономических факторов, что делает невозможным эффективно применять его в НИОКР при разработке технологий ПО.

Цель ПО – улучшение технико-экономических показателей добычи и переработки руд [11, п.1.3] путем удаления породы и некондиционных руд (с повышенным содержанием вредных примесей) из отбитой массы, разделения ее на продукты с задан-

ным качеством (бедные, рядовые, богатые), стабилизации качества сырья, поступающего на ОФ, но без указания путей достижения этой цели.

Предписываемый порядок проведения исследований, разработки ТЭО кондиций [11, п.2.3] противоречив и трудно реализуем. Действительно, для строительства ГОКа требуются обоснованные исходные данные, ТЭО инвестиций и проект. Методикой же предлагается фактически построить для их получения опытно-промышленное предприятие (ОПП) с объемом добычи около миллиона тонн в год селективной выемкой. Документ не обосновывает критерии представительности проб по вещественному и гранулометрическому составам, не раскрывает содержания понятия представительности по контрастности, требует для проведения исследований ПО не менее 100 транспортных порций.

Методикой предлагается [11, п.2] оценивать в ходе предварительной разведки месторождения прогнозные показатели обогащения с использованием результатов опробования, геофизических и лабораторных исследований вещественного состава, структурно-текстурных характеристик, строения рудных тел, соотношения богатых, рядовых и убогих руд, породных участков, гранулометрического состава рудной массы, ее контрастности, физического признака разделения и его эффективности, технологических параметров, учитываемых при разработке временных кондиций и проектировании дальнейших разведочных работ.

Рекомендации документа выполнимы в принципе в полевых условиях, при ручной сортировке порций и кусков, но не содержат указаний на то, как рассчитывать показатели обогащения по данным разведки, выбирать схемы, режимы работы многозвенной и многофакторной технологии рудоподготовки перед механическим разделением потока руды рудоконтролирующими станциями и сепараторами. Таким образом, требования ГКЗ [11] дополняют инструкции по классификации и оценке прогнозных запасов, отражают заинтересованность государства в развитии минерально-сырьевого комплекса,

кондиции, горно-добычная и обогащательная техника, технологии которого уступают лучшим зарубежным образцам и недостаточны для экономической активизации месторождений, проектирования ФПО.

Практика и численные оценки показывают [1, 6], что относительный рост прибыли горно-рудных предприятий определяется в решающей степени снижением геолого-экономического разубоживания руд $R_{г.э.}$, в меньшей степени – горно-технологического $R_{г.т.}$.

Тестовые (укрупненные лабораторные), опытно-промышленные испытания средств обогащения на золотосодержащих и редкометальных рудах подтверждают возможность выделения до 30-50 % породы и концентрации за счет этого полезного компонента в 1,5-2,0 раза [7, 8-10]. Более высокая степень концентрации сопровождается потерями 5-15 % металла и выше с хвостами ПО. Существенное расхождение теоретически возможных и достигнутых показателей свидетельствует о несовершенстве разработанных критериев оценки обогатимости руд, схем, технологий и средств ПО.

Между тем давно известно, что никакой, даже самый современный обогащательный аппарат и процесс не в состоянии обеспечить выделение концентрата или хвостов, если обработке подвергается слабо-контрастная руда, состоящая из кусков (частиц), мало различающихся между собой по содержанию полезного компонента [5].

Эмпирические разработки технологий приведения руд в состояние необходимой контрастности перед сортировкой осложняются тем, что для проведения достаточного числа опытов с представительными пробами крупностью до 350-500 мм требуются ОПП с мощностью по переработке горной массы порядка миллиона тонн в год, затраты на строительство которых сопоставимы со стоимостью ГОКа.

Действительно, масса представительной (вероятностно отобранной) пробы руды [7]

$$P = KD^a,$$

где D – максимальный размер кусков (частиц) в пробе; K – коэффициент, зависящий

от типа руды, равномерности распределения и размеров вкрапленности компонента по рудному телу, морфологических и структурно-текстурных характеристик месторождения; a – коэффициент, учитывающий массу пробы, $a = 2$ для проб малой массы; $a = 1,8$ для валовых проб.

Значения K для разных типов руд следующие:

Руды	K
Весьма равномерно вкрапленные	0,05
Равномерно вкрапленные	0,10
Неравномерно вкрапленные и равномерно вкрапленные золотые с мелким золотом	0,20
Неравномерно вкрапленные золотые с крупностью золотинок до 0,6 мм	0,40
Весьма неравномерно вкрапленные золотые с крупностью золотинок более 0,6 мм	0,80-1,0

Для золотосодержащих руд крупностью 350-500 мм с неравномерным распределением металла P составляет 120-250 т, а масса 100 транспортных порций, необходимых для технологических исследований и разработки ТЭО кондиций, согласно предписаниям работы [4], 20000 т руды. В действительности необходимое и достаточное число проб зависит от характеристик и свойств руд месторождения, технологий отбойки и транспортировки, количества природных и технологических факторов, значимо влияющих на обогатимость. Эти обстоятельства, а также требования теории планирования многофакторных экспериментов дают основания полагать, что для проведения исследований и испытаний ПО необходимо порядка $(1 \div 10) \cdot 10^3$ представительных проб с объемом руды в них около миллиона тонн (до 1 % от балансовых запасов месторождения).

Однако интерпретация результатов, выбор оптимальной схемы и технологии ПО для руд конкретного месторождения в условиях ОПП затруднен из-за отсутствия соответствующих методик, алгоритмов и программ. В связи с этим велика вероятность получения данных, использование которых при принятии управленческих решений, проектировании повлечет невозвратность значительных инвестиций в строительство ГОКа, может стать причиной его банкротства в рыночных условиях хозяйствования.

Выход заключается в применении расчетных методов исследования, но этому препятствует недостаточный уровень развития теории рудоподготовки и обогатимости, отсутствие математических моделей, описывающих физику процессов дробления и грохочения, усреднения и крупнотоннажной сортировки, кусковой сепарации руд, методик и средств (алгоритмов и компьютерных программ) проведения таких исследований, достоверной оценки показателей с использованием результатов геологической разведки [3], критериев выбора оптимальной комбинации методов и средств, режимов работы многозвенной и многофакторной технологии ПО.

Коллективом авторов настоящей статьи разработаны теоретические основы, математические модели процессов рудоподготовки и сортировки минерального сырья, учитывающие зависимость показателя обогатимости M от основных факторов горно-металлургического производства: крупности и гранулометрического состава, среднего содержания $\bar{C}$ полезного компонента и его содержания C_m в минеральных агрегатах, структурно-текстурных характеристик перерабатываемой руды и т.д. Это позволяет с минимальными затратами в процессе НИОКР, но с высокой достоверностью оценить технологические параметры, выбрать оптимальную схему ПО руд конкретного месторождения по данным геологической разведки с учетом вариаций показателей качества руд в процессе отработки месторождения, используя эмпирические методы исследования на лабораторном и полупромышленном уровне только в тех случаях и объемах, когда получить нужные сведения расчетными способами или из имеющегося промышленного опыта не представляется возможным. Предлагаемый инструментарий позволяет также выдавать рекомендации для адаптирования технологий добычи под запросы ФПО, готовить руды с необходимыми кондициями для последующего глубокого обогащения, наконец, определять пути и направления дальнейшего совершенствования средств ПО.

Прогнозные ТЭР, ТЭО кондиций и инвестиций на основе разработанных моделей

учитывают разубоживание руд месторождения, выход «машинного» класса руды после крупного и среднего дробления, степень перераспределения полезного компонента между «машинным» и «немашинным» классами вследствие избирательного дробления – грохочения, выход и извлечение полезного компонента в концентрат ПО при сортировке, относительные затраты на добычу и переработку в общей стоимости товарной продукции с применением существующих технологий глубокого обогащения и металлургического передела, зависимость затрат от роста объемов отбойки руды в порядке возмещения выделенной при сортировке части горной массы, извлечения от содержания полезного компонента в концентрате ПО, влияние других факторов производства.

Предлагаемые средства и инструментальный НИОКР, ТЭО обеспечивают разработку концепции проекта и технологического регламента на проектирование ФПО с минимальными финансовыми рисками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батугина Н.С. Новые аспекты оценки разубоживания руд при разработке месторождений / Н.С.Батугина, И.Д.Джемакулова, С.М.Ткач // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: Сб. науч. тр. Красноярск, 2006. Вып.4.
2. ГОСТ 14180-80 (СТ СЭВ 899-78) Руды и концентраты цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения содержания влаги. М., 1980.
3. Литвинцев Э.Г. Вероятностный метод расчета ожидаемых показателей радиометрической сепарации // Обогащение руд. 1984. № 1.
4. Мокроусов В.А. Контрастность руд, ее определение и использование при оценке обогатимости // Минеральное сырье. 1960. Т.1.
5. Мокроусов В.А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд / В.А.Мокроусов, В.А.Лилиева. М., 1979.
6. Опробование медных руд месторождений Казахстана рентгенометрическим методом / В.С.Портнов, А.К.Турсунбаева, А.Д.Маусымбаева, С.А.Ефименко // Журнал Сибирского федерального университета. Серия Техника и технологии. 2009. Т.2.
7. Опыт и практика рентгенометрической сепарации руд / Ю.О.Федоров, И.У.Кацер, О.В.Коренев и др. // Изв. вузов. Горный журнал, 2005, № 5.

8. Опыт и практика рентгенометрической сепарации (РПС) золотосодержащих и других типов руд / Ю.О.Федоров, О.В.Коренев, В.А.Короткевич, В.П.Цой, М.Ю.Федоров, П.И.Ковалев, И.У.Кацер // Золотодобывающая промышленность. 2004. № 4.

9. Пухальский Л.Ч. Теория контрастности урановых руд. М., 1963.

10. Ревнивцев В.И. Рентгенометрическое обогащение комплексных руд цветных и редких металлов / В.И.Ревнивцев, Т.Г.Рыбакова, Е.П.Леман. М., 1990.

11. Требования к изучению радиометрической обогатимости минерального сырья при разведке месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых / ГКЗ. М., 1993.

12. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М., 1972.

13. Чантурия В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Вестник ОГГГН РАН, № 4 (6). 1998.

REFERENCES

1. Batugina N.S. New Aspects of dilution of ore at mining / N.S.Batugina, I.D.Dzhemakulova, S.M.Tkach // Modern technologies of mineral resources: Scientific works. Krasnoyarsk. 2006. Release 4.
2. GOST 14180-80 (ST SEV 899-78) Ores and concentrates of base metals. Methods of sampling and preparation of samples for the chemical analysis and determination of moisture content. Moscow, 1980.
3. Litvinsev E.G. A probabilistic method for calculating the expected rates of radiometric separation // Enrichment of ore. 1984. N 1.
4. Mokrousov V.A. Contrast ores, its definition and use in assessing enrichment-bridge // Mineral raw materials. Moscow, 1960. Vol.1.
5. Mokrousov V.A. Radiometric concentration of non-radioactive ores / V.A.Mokrousov, V.A.Lilieva. Moscow, 1979.
6. X-ray Radiometrically Approbation of Copper Ores of Kazakhstan Deposits / V.S.Portnov, A.K.Tursunbaeva, A.D.Mausimbaeva, S.A.Efimenko // The Siberian Federal University Journal. 2009. Vol.2.
7. Experience and practice of x-radiometric separation ores / Y.O.Fedorov, I.U.Katser, O.V.Korenev a.o. // Proceedings of the universities. Mining Journal. 2005. N 5.
8. Experience and practice of X-ray radiometric separation (PPC) and other types of gold-bearing ores / Y.O.Fedorov, O.V.Korenev, V.A.Korotkevich V.P.Choi, M.U.Fedorov, P.I.Kovalev, I.U.Katser // Gold Mining Industry. 2004. N 4.
9. Puhalskii L.Ch. Contrast theory of uranium ore. Moscow, 1963.
10. Revnivcev V.I. X-ray radiometric enrichment complex of non-ferrous and rare metals / V.I.Revnivcev, T.G.Rybakov, E.P.Lehman. Moscow, 1990.
11. Requirements for studying radiometric washability mineral exploration for metallic and non-metallic minerals. Moscow, 1993.
12. Khodakov G.S. Physics grinding. Moscow, 1972.
13. Chanturia V.A. Modern problems of enrichment mineral resources in Russia. Herald DGGMS RAS, N 4(6). 1998.